Ministry of Science, Research and Technology
Institute for Color Science & Technology

Available online @ www.jscw.icrc.ac.ir
Journal of Studies on Color World, 13, 2(2023), 185-200
Article type: Review article
Open access

مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

Review of the Application of Thermochromic Materials in the Preparation of Smart Textiles

Vida Abeditame[1], Farideh Talebpour*[2], Kamaledin Gharanjig[3], Mojtaba Jalili[4]
1- Faculty of Art, Alzahra University, P. O. Box:1993893973, Tehran, Iran.
2- Department of Textile and Fashion Design, Faculty of Art, Alzahra University, P. O. Box:1993893973, Tehran, Iran.
3- Department of Organic Colorants, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.
4- Department of Printing Science and Technology, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

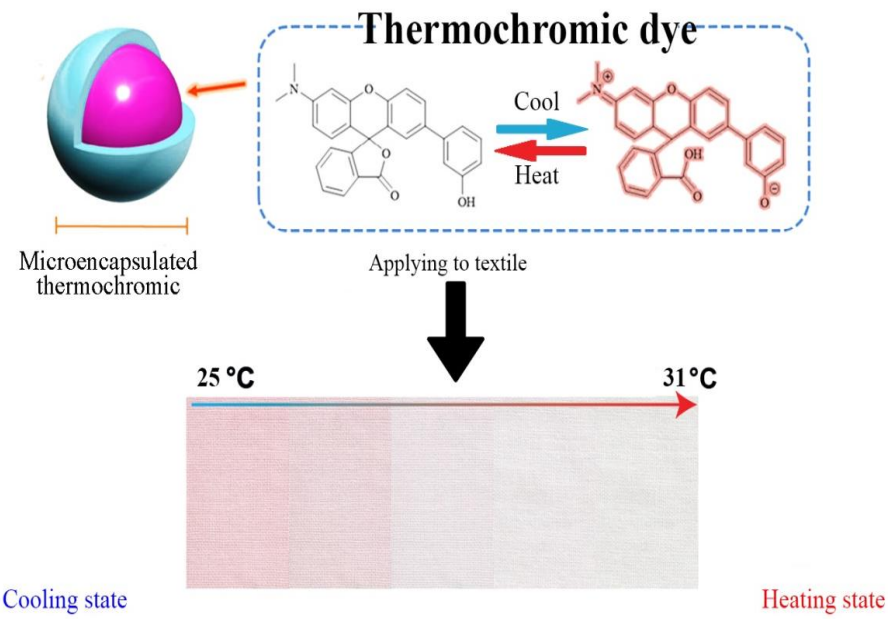
Article history:
Received: 14- 02- 2023
Accepted:02 -05 -2023
Available online:13 -09-2023
Print ISSN: 2251-7278
Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.2.4.8

Keywords:
Thermochromic materials
Smart Textiles
Color Change
Intelligentization

ABSTRACT

Temperature-sensitive color-changing materials, called thermochromic materials, reversibly change the color of goods under an external stimulus, i.e., temperature. These materials are used to prepare smart textiles due to color changes in a certain temperature range. Different thermochromic materials are available, which can be classified into direct and indirect. The mechanism of color change in direct thermochromic systems is molecular rearrangement, change in crystal structures, and stereoisomerism. In contrast, the mechanism of color change in indirect systems is halochromism or ionochromism. Thermochromic materials change color repeatedly and reversibly with increasing and decreasing temperature and can change from colored to colorless or vice versa or from one color to another. These materials can be combined with normal dyes to obtain newer colors. Thermochromic colorants cannot be used directly on textiles due to their high environmental sensitivity and low reactivity. Usually, their components are stabilized by different microencapsulation methods. These materials are used to produce smart textiles through dyeing or printing. Smart textiles are used in various fields, such as wearable displays, sensors, camouflage materials, anti-counterfeiting methods, and military industries. Textiles printed with thermochromic microcapsules have good stability against washing but are very sensitive to light, solvents, and high temperatures and are destroyed.



Corresponding author: **talebpour@alzahra.ac.ir**

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

نشریه علمی
مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه رنگ

دسترسی آنلاین: www.jscw.icrc.ac.ir
نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ/ ۱۳، (۱۴۰۲) ۲، ۲۰۰-۱۸۵
نوع مقاله: مروری
دسترسی آزاد

مروری بر کاربرد مواد ترموکرومیک در تهیه منسوجات هوشمند

ویدا عابدی طامه[۱]، فریده طالب پور[۲*]، کمال الدین قرنجیک[۳]، مجتبی جلیلی[۴]

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده هنر، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۹۹۳۸۹۳۹۷۳.
۲- استاد، گروه طراحی پارچه و لباس، دانشکده هنر، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۹۹۳۸۹۳۹۷۳.
۳- استاد، گروه پژوهشی مواد رنگزای آلی، پژوهشکده مواد رنگزا، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.
۴- استادیار، گروه پژوهشی علوم و فناوری چاپ، پژوهشکده فیزیک رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.

اطلاعات مقاله

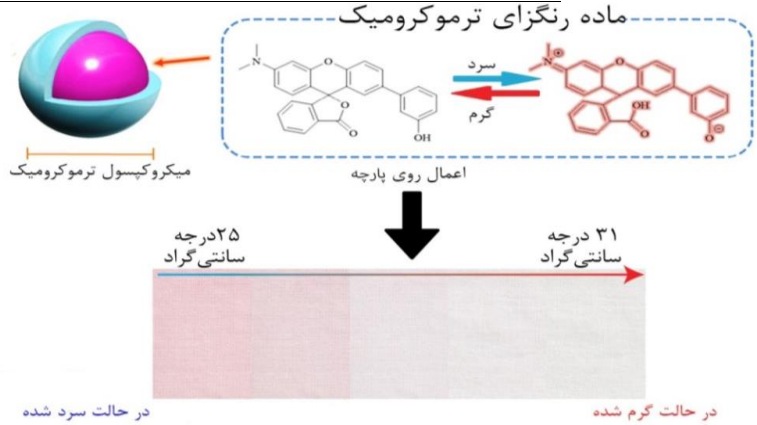
تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۲
در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲
شاپا چاپی: ۷۲۷۸-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۲۲۲۳-۲۳۸۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.2.4.8

واژه‌های کلیدی:
مواد ترموکرومیک
منسوجات هوشمند
تغییر رنگ
هوشمندسازی

چکیده

مواد تغییر رنگ‌دهنده حساس به دما، که به آن‌ها مواد ترموکرومیک گفته می‌شود، به طور برگشت‌پذیر، رنگ کالا را تحت تاثیر محرک خارجی یعنی دما تغییر می‌دهند. این مواد به واسطه تغییر رنگ در یک محدوده دمایی خاص برای تهیه منسوجات هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرند. انواع مختلفی از مواد ترموکرومیک در دسترس هستند که می‌توان آن‌ها را به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم طبقه بندی کرد. سازوکار تغییر رنگ سامانه‌های ترموکرومیک مستقیم بازآرایی مولکولی، تغییر در ساختار بلوری و استریوایزومری است در حالی که سازوکار تغییر رنگ در سامانه‌های غیرمستقیم پدیده‌های هالوکرومیسم یا آیونوکرومیسم می‌باشند. مواد ترموکرومیک با افزایش و کاهش دما به طور مکرر و برگشت‌پذیر تغییر رنگ می‌دهند و می‌توانند از حالت رنگی به بی‌رنگی و یا برعکس و یا از یک رنگ به رنگ دیگر تغییر کنند. این مواد را می‌توان با مواد رنگزای معمولی ترکیب کرد و رنگ‌های جدیدتری به دست آورد. مواد رنگزای ترموکرومیک به دلیل حساسیت بالای محیطی و خاصیت واکنش‌پذیری کم، نمی‌توانند بطور مستقیم بر روی منسوجات استفاده شوند. معمولا اجزای سازنده آن‌ها به روش‌های مختلف میکروکپسول‌سازی پایدار می‌شوند. مواد ترموکرومیک از طریق رنگرزی یا چاپ برای تولید منسوجات هوشمند بکار برده می‌شوند. این منسوجات در زمینه‌های مختلفی مانند نمایشگرهای پوشیدنی، حسگرها، مواد استتاری، مواد ضد جعل و صنایع نظامی استفاده می‌شوند. منسوجات چاپ شده با میکروکپسول‌های ترموکرومیک در برابر شستشو از خواص ثباتی مناسبی برخوردارند، اما نسبت به نور، حلال‌ها و دماهای بالا بسیار حساس هستند و تخریب می‌شوند.



Corresponding author: talebpour@alzahra.ac.ir

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

رنگ‌کردن کالای نساجی با مواد رنگزای رایج، در فناوری‌های جدید رو به رشد صنعت نساجی، دیگر پاسخ‌گوی نیازهای فعلی نیست. امروزه تحقیقات گسترده‌ای برای بهبود عملکرد مواد رنگزا در جهان صورت می‌گیرد. به عنوان مثال مواد رنگزایی که به گرما و سرما واکنش نشان داده و تغییر رنگ می‌دهند بسیار مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از مواد تغییر رنگ‌دهنده در اثر محرک‌های خارجی، در لباس‌ها و منسوجات باعث بهبود عملکرد آن‌ها می‌شود. این مواد می‌توانند رنگ پوشاک را تحت تاثیر نور، دما یا رطوبت تغییر داده و ظاهر چشمی آن را از حالت ثابت منظم به حالت پویا تغییر دهند (۱).

مواد تغییر رنگ‌دهنده با محرک خارجی، نوع جدیدی از مواد کاربردی هستند که به طور برگشت‌پذیر، رنگ کالا را تحت تاثیر این محرک‌ها تغییر می‌دهند. به عبارتی دیگر، نوار جذبی آن‌ها با اعمال محرک خارجی، بطور محسوسی تغییر می‌کند و با حذف محرک، رنگ مجددا به حالت اولیه خود برمی‌گردد. تغییرات ممکن است از بی‌رنگی تا ایجاد رنگ یا برعکس، تغییر فام یا شدت رنگ باشد (۲). با توجه به نوع منبع محرک مانند دما، نور، الکتریسیته، حلال، فشار و مغناطیس، مواد تغییر رنگ‌دهنده به دسته‌های مختلف ترموکرومیک، فتوکرومیک، الکتروکرومیک، سولواتوکرومیک و غیره تقسیم می‌شوند (۳). این مواد در دسته مواد هوشمند قرار می‌گیرند.

در سال‌های اخیر، مواد تغییر رنگ‌دهنده حساس به دما، که به آن‌ها مواد ترموکرومیک گفته می‌شود، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مواد ترموکرومیک به ترکیباتی اطلاق می‌شود که در یک محدوده دمایی خاص به دلیل تغییر ساختاری‌شان، تغییر رنگ می‌دهند و به طور گسترده در منسوجات هوشمند، چاپ‌های امنیتی و موارد دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد به این دلیل هوشمند شناخته می‌شوند که توسط یک محرک خاص و قابل اندازه‌گیری، تحریک شده و تغییر رنگ قابل برگشت می‌دهند. اثرات متقابل مواد رنگزای هوشمند و منسوجات نساجی که از طریق اضافه کردن مواد رنگزا به الیاف نساجی به روش‌های مختلف مانند رنگرزی یا چاپ به دست می‌آید، منجر به ساخت یک منسوج حسگر می‌گردد که قادر به حس‌کردن و انجام واکنش به یک محرک خاص به شیوه‌ای قابل پیش‌بینی می‌شود (۴).

منسوجات ترموکرومیک حوزه جدیدی با فرصت‌هایی بالقوه برای ساخت محصولات نوآورانه هستند که می‌توانند شیوه تعامل افراد با لباس‌هایشان را متحول کنند. تحقیق و توسعه پارچه‌ها و پوشاک ترموکرومیک در سال‌های اخیر توسعه یافته و تلاش‌ها بر تقویت و گسترش قابلیت‌های منسوجات متمرکز شده است. منسوجات ترموکرومیک دسته ای از منسوجات با فناوری پیشرفته و پتانسیل فوق‌العاده در زمینه‌های مختلف هستند که آن‌ها را قادر به دریافت محرک و پاسخگویی می‌کند. این منسوجات به دلیل خواص بی‌نظیر در زمینه های مختلفی مانند نمایشگرهای پوشیدنی، حسگرها، مواد استتاری یا ضدجعل و حتی صنایع نظامی به یک حوزه فعال تحقیقاتی تبدیل شده است (۵). تحقیق در زمینه منسوجات هوشمند به طور مداوم در حال توسعه است و رویکرد چند رشته ای عامل اصلی این گسترش قابل‌توجه است. دانش طراحی مدار، مواد هوشمند، میکروالکترونیک و شیمی اساساً با درک عمیق ساخت پارچه ادغام شده است و پارچه‌هایی با کارایی بالا و بهتر را در دسترس بشر قرار داده است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در طول تاریخ، بیشترین پیشرفت‌ها در صنعت نساجی در تهیه بهترین الیاف، نخ، پارچه، پوشاک یا کف‌پوش بوده است تا بیشترین راحتی را برای انسان فراهم سازد و سازگار با محیط زیست هم باشد. امروزه پیشرفت‌های اندکی در زمینه کاربرد مواد هوشمند در کالای نساجی به چشم می‌خورد. با این حال، منسوجات در حال انتقال به عصر جدیدی هستند که در آن دانش و هنر با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا محصولاتی با ارزش افزوده بیشتر ارائه شوند. بنابراین در این مقاله پژوهش‌های مرتبط با مواد ترموکرومیک و کاربرد آن‌ها در صنعت نساجی، منسوجات هوشمند و پدیده ترموکرومیسم در محصولاتی با ارزش افزوده بیشتر مرور می‌شود. در این راستا مواد ترموکرومیک مصرفی در منسوجات هوشمند معرفی و سازوکار تغییر رنگ آن ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین انواع مواد ترموکرومیک و نحوه اعمال آن ها بر روی پارچه و در نهایت کاربرد مواد ترموکرومیک در نساجی شرح داده می‌شود.

۲- مواد هوشمند در اثر تغییر رنگ[1]

رایج‌ترین تعریف مواد هوشمند این است که چنین موادی می‌توانند توسط تأثیرات فیزیکی، شیمیایی یا مکانیکی محیط، فعال شوند و به طور قابل پیش‌بینی به محیط اطراف خود واکنش دهند (۶). یکی از سازوکارهای ارایه دهنده مواد هوشمند تغییر رنگ در اثر محرک‌های خارجی است. که پدیده کرومیسم را در بر می‌گیرد. کرومیسم فرآیندی است که باعث تغییر رنگ برگشت‌پذیر اجزای متشکل یک ترکیب شیمیایی می‌شود. این ترکیب شامل تغییرات در سطح مولکولی مانند شکست پیوندهای شیمیایی یا تغییراتی است که در داخل مولکول‌ها و الکترون‌ها رخ می‌دهد (۷). موادی که توانایی نشان دادن پدیده کرومیسم را دارند به عنوان مواد کرومیک شناخته می‌شوند (۸، ۹). برخی از ترکیبات طبیعی دارای خاصیت کرومیک هستند، در حالی که تعدادی از ترکیبات مصنوعی با خواص کرومیک، از طریق سنتز بدست می‌آیند (۱۰). تغییر رنگ در نتیجه فعل و انفعالات بین نور تابشی و مواد صورت می‌گیرد. این تعاملات را

[1] Chromism

می‌توان به پنج گروه: تغییر رنگ برگشت‌پذیر، جذب و بازتاب نور، جذب انرژی و به دنبال آن گسیل نور، جذب نور و انتقال انرژی یا تبدیل انرژی و بکارگیری نور (۸) دسته‌بندی کرد. این اثرات کرومیکی ناشی از عوامل زیر است :

-واکنش‌های حلقوی شدن[1] (سیکلودیشن[2])

- ایزومری‌شدن سیس ترانس[3]

-انتقال بین مولکولی یک گروه

-انتقال بین مولکولی هیدروژن

-گسستگی (شکاف پیوندها)

-انتقال الکترون (۱۱).

به‌دلیل اینکه مواد کرومیک به عوامل محیطی با تغییر حالت - برگشت‌پذیر- پاسخ می‌دهند، با نام "مواد آفتاب پرست[4]" نیز شناخته می شوند (۱۲). انواع مواد کرومیسم با پسوندی از محرک های خارجی مختلف که باعث تغییر رنگ آن‌ها می‌شوند، تعریف شده‌اند، مانند فتوکرومیک[5] با محرک خارجی نور، ترموکرومیک[6] با محرک خارجی دما، سالواتوکرومیک[7] با محرک خارجی حلال، الکتروکرومیک[8] با محرک خارجی الکتریسیته، پیزوروکرومیک[9] با محرک خارجی فشار، هالوکرومیک[10] با محرک خارجی pH، آیونوکرومیک[11] با محرک خارجی یون و کارسول کرومیک[12] با محرک خارجی پرتو الکترونی (۱۳).

۲-۱- مواد ترموکرومیک

فرآیند برگشت‌پذیر رنگ ناشی از تغییر دما را ترموکرومیسم می‌گویند (۱). بسته به نوع ماده ترموکرومیک، تغییر رنگ در دمای خاصی رخ می‌دهد که به آن دمای انتقال ترموکرومیک گفته می‌شود. هنگامی که ماده به دمای انتقال می‌رسد، تغییر رنگ بسیار سریع اتفاق می‌افتد (۱۴). اولین توصیف یک پدیده ترموکرومیک در سال ۱۹۲۹ میلادی انجام شد که در آن محلول بی‌رنگ دی-β-نفتواسپیران[13] تحت حرارت به فام آبی- بنفش تبدیل شد. این ترکیب وقتی سرد شد دوباره رنگ خود را از دست داد (۱۵).

برای واکنش‌های ترموکرومیسم از ترکیبات آلی یا غیرآلی استفاده می‌شود. به عبارتی دیگر، سامانه‌های ترموکرومیک به هر دو گروه شیمیایی معدنی و آلی تعلق دارند (۱۶). طبقه بندی شیمیایی باعث می‌شود اجزای مواد ترموکرومیک آلی و غیرآلی از یکدیگر متمایز شوند. دمای انتقال اکثر مواد غیر آلی حساس به دما بسیار بالا است، بنابراین برای استفاده در بسترهای نساجی مناسب نیستند. مواد آلی ترموکرومیک بیشترین کاربرد را در نساجی دارند. تغییر رنگ آن‌ها می‌تواند به طور مستقیم یا غیرمستقیم رخ دهد (۱۷).

۲-۱-۱- سامانه‌های ترموکرومیک مستقیم و غیرمستقیم

فرآیندهای تغییر رنگ سامانه های ترموکرومیک مستقیم شامل موارد زیر است:

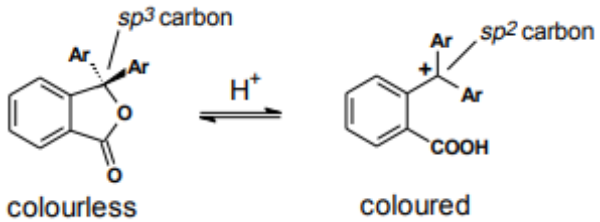
- بازآرایی مولکولی

-تغییر ساختار بلوری

-استریوایزومریزم

تغییرات ساختار بلور مایع و بازآرایی مولکولی فرآیندهایی هستند که بیشتر در محصولات نساجی استفاده می‌شوند (۱۷). سامانه‌های بازآرایی مولکولی با سازمان‌دهی مجدد سامانه مولکولی مواد ترموکرومیک از طریق گرم‌کردن و سردکردن، باعث تغییر رنگ می‌شوند. فرآیند اصلی این گروه از مواد رنگزا با اینکه تنوع رنگی پایین و قیمت بالاتری دارند اما از نظر تغییر رنگی بهتر عمل می‌کنند (۱۸).

سامانه‌های ترموکرومیک غیرمستقیم قادر به تغییر رنگ خود در هنگام تغییر دمای محیط هستند. آن‌ها غیر از مواد رنگزا از مواد دیگری نیز در ترکیب خود استفاده می‌کنند. اغلب از مواد هالوکرومیک یا آیونوکرومیک استفاده می‌شود. تغییر دمای محیط باعث تغییر خواص فیزیکی و یا شیمیایی محیط می‌شود، مانند تغییر pH یا جریان یون. سپس ماده کرومیک رنگ خود را با توجه به این تغییر فیزیکی و شیمیایی تغییر می‌دهد. این پدیده به عنوان ترموکرومیک در نظر گرفته می‌شود در حالی که پدیده تغییر رنگ ترموکرومیسم نیست. مثالی از این ترکیبات در شکل ۱ دیده می‌شود. ماده ترموکرومیک خود ذاتا حساس به دما نیست و در اثر دما تغییر رنگ نمی‌دهد. تغییر رنگ سامانه به واسطه تغییر pH محیط با تغییر دما اتفاق می‌افتد.



شکل ۱: تغییر رنگ یک ماده ترموکرومیک در اثر تغییر شرایط محیط (۱۹).

Figure 1: Color change of a thermochromic material due to changing environmental conditions (19).

[1] Pericyclic reactions
[2] Cycloaddition
[3] Cis-trans isomerization
[4] Chameleonic materials
[5] Photochromic
[6] Thermochromic
[7] Solvatochromic
[8] Electrochromic
[9] Piezochromic
[10] Halochromic
[11] Ionochromic
[12] Carsolchromic
[13] Di-β-naphthospiran

اکثر رنگ‌سازهایی که در این سامانه‌ها به کار می‌روند بر پایه اسپیرونولاکتون‌ها[1] هستند. وقتی حلقه بسته است ترکیب به واسطه قطع سامانه مزدوج یا کونژوگه بی‌رنگ است. به حضور پیوندهای دوگانه و یگانه بطور متناوب در ترکیبات آلی سامانه‌های مزدوج گویند. اگر تعداد پیوندهای دوگانه در این سامانه زیاد شود منجر به ایجاد رنگ می‌گردد. ترکیب در حالت باز به دلیل تشکیل اتم کربن مرکزی با هیبرید sp^2 و گسترش سامانه مزدوج، رنگی است. تغییر ساختار شیمیایی در اثر حضور یک اسید ضعیف در محیط صورت می‌گیرد. سامانه‌های ترموکرومیک غیرمستقیم کاربرد بیشتری از سامانه‌های ترموکرومیک مستقیم دارند (۸).

بلور بنفش لاکتون به عنوان یکی از مواد تشکیل‌دهنده رنگ در مواد ترموکرومیک غیرمستقیم در تهیه کاغذهای ضبط ترموگرافی[2] ماشین‌های فکس به کار می‌رود. سطح کاغذ با یک کامپوزیت پلیمری حاوی مواد رنگزا و اسید پوشش داده می‌شود، بطوری که آن‌ها بطور جداگانه در بستر پلیمری پخش شده است. در این حالت ترکیب بی‌رنگ است. اسید مورد استفاده معمولا بیس فنل آ است. در اثر ایجاد حرارت موضعی بر روی کاغذ، پلیمر ذوب شده و ماده رنگزا با اسید واکنش می‌دهد. بدین ترتیب رنگ بطور غیربرگشت‌پذیر ظاهر می‌شود. گرچه این پدیده با تعریف اولیه مواد ترموکرومیک در تضاد است. با این حال کامپوزیت‌هایی وجود دارند که در آن‌ها از مواد رنگزا، ظاهر شونده‌ها و جامدهایی که به آسانی ذوب می‌شوند (حلال‌های کمکی) به نسبت‌های مناسب تهیه شده و سبب می‌شوند تا فرآیند تغییر رنگ در اثر حرارت برگشت‌پذیر باشد. حلال‌های کمکی مورد استفاده ترکیبات غیرآبدوست با نقطه ذوب کم مثل الکل چرب، اسید چرب یا آمید هستند که در آن ماده رنگزا و ظاهرشونده با یکدیگر واکنش می‌دهند. کامپوزیت تهیه شده هنگامی که حرارت داده می‌شود بی رنگ است. زیرا ماده رنگزا و اسید در حلال کمکی بطور مجزا قرار می‌گیرند. اما در حالت سرد بین مولکول‌های ماده رنگزا و اسید واکنش رخ می‌دهد و رنگ تشکیل می‌شود (شکل ۲) (۱۹).

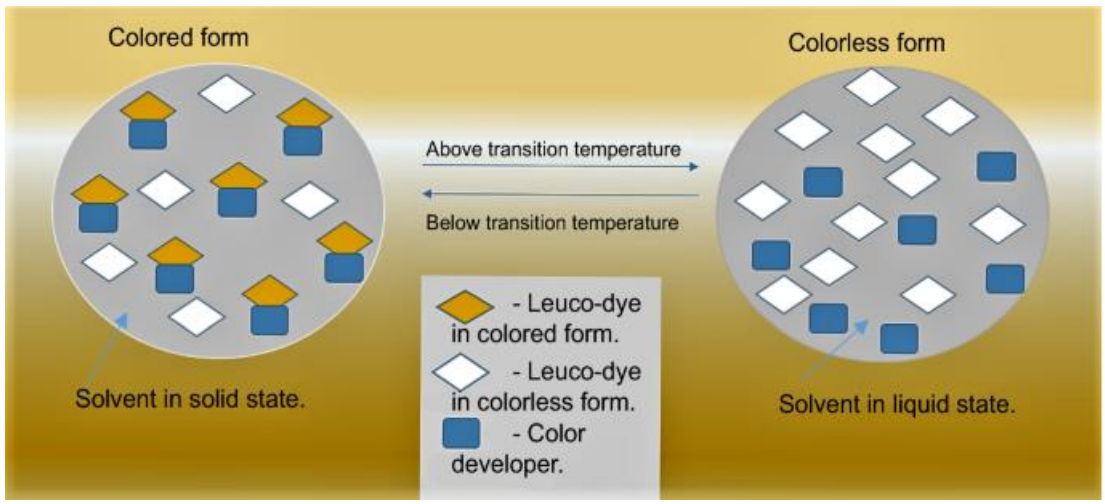
۲-۲- مواد رنگزای ترموکرومیک

مواد رنگزای ترموکرومیک در صنایع مختلف از جمله نساجی، نظامی و پلاستیک استفاده می‌شود. این مواد معمولاً در دو نوع مختلف بلور مایع و لوکو تولید می‌شوند (۲۲، ۲۱).

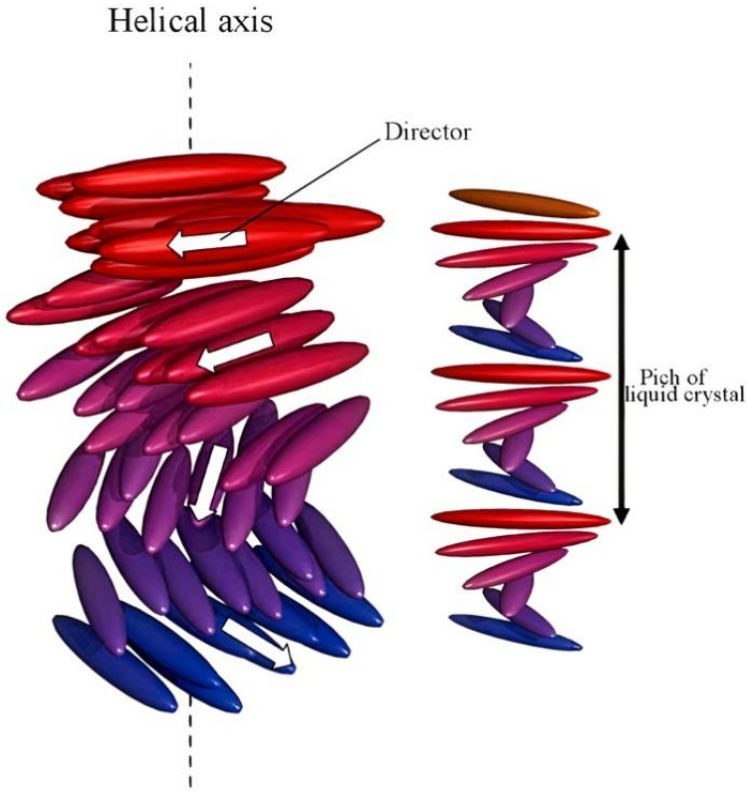
۲-۲-۱- مواد رنگزای ترموکرمیک بر پایه بلور مایع

مواد ترموکرومیک بلور مایع، یکی از سامانه های ترموکرومیک مستقیم است که طیفی از تغییرات رنگ را نشان می‌دهند، زیرا به طور انتخابی طول موج های خاصی از نور را از خود منعکس می‌کنند (۲۳). این تغییر رنگ مداوم به دلیل تغییر آرایش مولکولی بلور مایع در اثر حرارت رخ می‌دهد. مواد ترموکرومیک ممکن است از بلورهای مایع کلستریک یا مخلوطی از بلورهای مایع کلستریک و نماتیک[3] تشکیل شده باشند. بلورهای مایع کلستریک معمولاً ساختار مارپیچی دارند و کایرال[4] هستند. مواد بلور مایع نوع نماتیک کایرال قادر به بازتاب نور مرئی هستند (شکل ۳) و به تغییرات دما پاسخ می‌دهند و باعث ایجاد تغییرات در سایه رنگ بازتاب شده می‌شوند (۸). مولکول‌ها بصورت مارپیچ حول محور مارپیچ[5] قرار می‌گیرند. در هر لایه از مارپیچ، مولکول‌ها به صورت نامنظم کنار هم قرار دارند. در بلورهای مایع نماتیک، به جهت محورهای مولکولی «هدایت‌کننده[6]» گفته می‌شود.

[1] Spironolactone
[2] Thermographic recording paper
[3] Nematic liquid crystal
[4] Chiral
[5] Helical axis
[6] Director



شکل ۲: سازوکار تشکیل رنگ برگشت‌پذیر ماده ترموکرومیک غیرمستقیم (۲۰).
Figure 2: Mechanism of reversible color formation of indirect thermochromic material (20).



شکل ۳: ساختار فاز نماتیک کایرال (۲۵).
Figure 3: Illustrative structure of the chiral nematic phase (25).

در هر لایه از مولکول‌های بلورهای مایع نماتیک کایرال، به تدریج حول محور مارپیچ، می‌چرخند. فاصله‌ای که در آن هدایت کننده ۳۶۰ درجه می‌چرخد و به جهت اولیه باز می‌گردد، طول گام[1] نامیده می‌شود. گام مهم‌ترین مشخصه یک بلور مایع کلستریک است، زیرا منجر به انعکاس انتخابی نور با طول موج برابر با طول گام می‌شود. حساسیت طول گام به دما منجر به رفتار کرومیک بلور مایع کلستریک می‌شود (۲۲ ،۲۱). انعکاس انتخابی نور با طول موج برابر با طول گام از ویژگی‌های مهم یک بلور مایع کلستریک است. تغییر دما به طور موثر منجر به انبساط حرارتی ساختار بلور مایع می‌شود. در نتیجه، اثر تغییر رنگ بصری با دما به دلیل تغییر در فاصله لایه‌ها و گام‌های بلور مایع متفاوت است (۱۶).

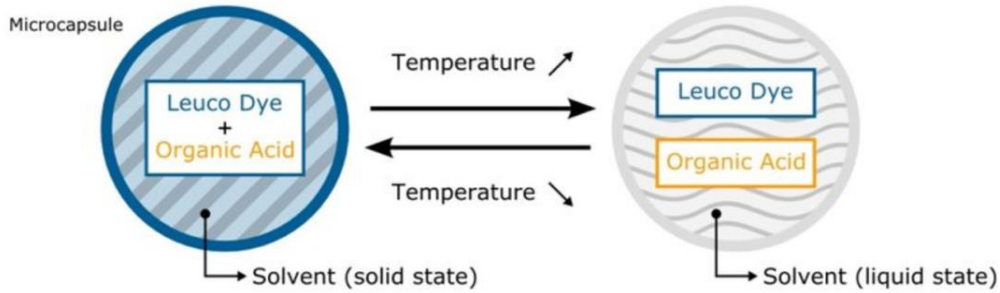
بلورهای مایع حالت میانی بین فاز مایع و فاز بلوری هستند، که باعث تسهیل حرکت مولکول های خود می‌شوند، از طرفی درجه خاصی از آرایش را حفظ می‌کنند. آرایش مولکولی آن ها به تغییرات دما حساس است. علاوه بر این، خواص بازتابی بلور مایع به این آرایش بستگی دارد. در نتیجه، تغییر دما باعث تغییر رنگ بلور مایع می‌شود (۲۴).

۲-۲-۲- مواد رنگزای ترموکرومیک بر پایه لوکو

مواد رنگزای ترموکرومیک آلی تحت عنوان رنگ های لوکو، در دسته مواد ترموکرومیک غیرمستقیم قرار می‌گیرند. آن ها از سه جزء اصلی تشکیل شده اند. رنگ ساز کرومیک بر پایه لوکو، توسعه‌دهنده رنگ که معمولا یک اسید ضعیف است و حلال که معمولا یک الکل یا یک استر می‌باشد. مخلوطی از این مواد میکروکپسوله می‌شوند تا محصول نهایی ترموکرومیک به دست آید (۲۶). توسعه‌دهنده رنگ می‌تواند یک پروتون به رنگ ساز اهدا کند. تبادل پروتون بین این دو جزء باعث تغییر رنگ در مواد رنگزای ترموکرومیک می‌شود. همانطوری که در شکل ۴ دیده می‌شود حلال موجود در میکروکپسول حاوی ماده رنگزای لوکو و اسید آلی در دمای پایین جامد است. بنابراین بین ترکیب لوکو و اسید آلی واکنش رخ می‌دهد و رنگ ظاهر می‌شود. هنگامی که این میکروکپسول حرارت داده می‌شود حلال به مایع تبدیل شده و از تماس بین ماده رنگزای لوکو و اسید آلی جلوگیری می‌کند. در نتیجه، ترکیب لوکو از سازنده رنگ که یک اسید آلی است جدا می‌شود و تغییر رنگ رخ می‌دهد. نقطه ذوب حلال کمکی نقطه تغییر رنگ را تعیین می‌کند (۲۸ ،۲۷).

ترکیبات لوکو ترموکرومیک اساساً به دلیل آرایش مجدد مولکولی در ساختار شیمیایی خود، یک تغییر رنگ واحد را نشان می‌دهند. این تغییر رنگ از رنگی به رنگ دیگر، یا از حالت رنگی به بی‌رنگی به صورت برگشت پذیر رخ می‌دهد (۳۱ ،۳۰).

[1] Pitch length



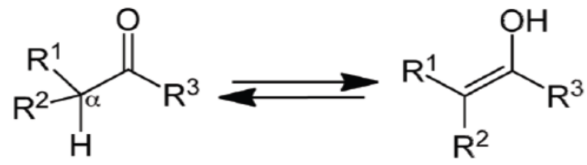
شکل ۴: طرح‌واره از اصل عملکرد یک ترموکرومیک مبتنی بر رنگ لوکو (۲۹).
Figure 4: Schematic illustration of the operation principle of a leuco dye-based thermochromic (29).

توتومریسم کتو-انول یا باز شدن حلقه دو سازوکار، بازآرایی مولکولی هستند. به طورکلی، توتومریسم به تبدیل دو ایزومر آلی در حالت تعادل اشاره دارد. این واکنش بر اساس مهاجرت و جابجایی اتم‌های هیدروژن (پروتون‌ها) اتفاق می‌افتد. یکی از رایج‌ترین انواع واکنش های توتومریک تبدیل ساختار کتون و به شکل انول آن است. شکل ۵ تعادل توتومرهای کتو-انول را نشان می‌دهد (۳۲، ۳۳).

تغییر دمایی که باعث بازآرایی توتومریسم می‌شود، منجر به تولید یک گروه رنگ‌ساز جدید می‌شود. در بیشتر موارد، ترکیب لوکو شامل یک رنگ‌ساز حاوی گروه دهنده‌الکترون، یک سازنده رنگ پذیرنده الکترون و یک عامل کنترل کننده تغییر رنگ است. به عبارت دیگر، یک رنگ لوکو از یک رنگ‌ساز آلی، یک فعال کننده اسیدی و یک حلال غیر قطبی ساخته شده است. در این ترکیب یابد از حلال جامد با نقطه ذوب پایین مانند استر یا الکل استفاده شود. در دماهای پایین (کمتر از نقطه ذوب حلال) رنگ‌ساز و سازنده با یکدیگر در تماس هستند به همین دلیل است که رنگ قابل مشاهده است. پس از گرم شدن (بالاتر از نقطه ذوب حلال) رنگ‌ساز و سازنده رنگ از یکدیگر جدا شده و از هرگونه برهم‌کنش الکترونی جلوگیری می‌کنند. این امر باعث بی‌رنگ می‌شود (۳۴).

۲-۳-دمای فعال سازی

دمای فعال سازی برای تعیین دمایی که در آن فرآیند رنگ دهی یا تغییر رنگ رخ می‌دهد، استفاده می‌شود.



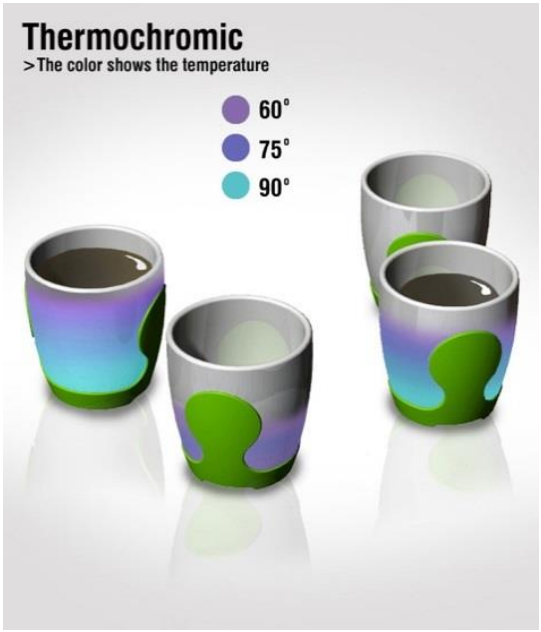
شکل ۵: سازوکار توتومریسم کتو-انول (۲۲).
Figure 5: Mechanisms of keto-enol tautomerism (22).

مواد ترموکرومیک مبتنی بر ترکیب لوکو، یک کامپوزیت ترموکرومیک است که شامل یک رنگ ساز و یک توسعه دهنده رنگ حل شده در یک حلال است. کامپوزیت در یک پوشش محافظ میکروکپسوله شده است تا از محتویات آن در برابر محیط محافظت کند(۳۵). رنگ‌ساز بسته به دما به دو شکل رنگی و بی‌رنگ است. در حالت سرد، کامپوزیت به شکل جامد باقی می‌ماند و رنگ‌ساز شکل رنگی خود را ارایه می‌دهد. در حالت گرم، حلال ذوب می‌شود و برهم‌کنش بین حلال و رنگ‌ساز کامپوزیت را از بین می‌برد، در نتیجه باعث می‌شود که رنگ ساز شکل بی‌رنگ به خود بگیرد. دمای فعال‌سازی با دمایی که در آن حلال از حالت جامد به حالت مایع تغییر می‌کند، تعریف می‌شود (۳۶).

مواد رنگزای لوکو ترموکرومیک با دمای فعال‌سازی متفاوت، از ۱۵- تا ۶۵ درجه سانتی‌گراد در دسترس هستند. با این حال، اکثر کاربردها به سه محدوده دمای استاندارد، سرد (~ ۱۰ درجه سانتی‌گراد)، دمای بدن انسان (~ ۳۱ درجه سانتی‌گراد) و گرم (~ ۴۳ درجه سانتی‌گراد) محدود می‌شود (۳۷). مواد ترموکرومیک بلور مایع برای دماهای بین ۳۰- درجه سانتی‌گراد و ۱۲۰+ درجه سانتی‌گراد در بازار قابل دسترس هستند (۱۸). در شکل ۶ تغییر رنگ برخی از محصولات حاوی مواد ترموکرومیک در اثر حرارت و در دماهای مختلف نشان داده شده است.

۲-۴-کاربرد مواد ترموکرومیک در صنعت چاپ

معمولاً ترکیبات لوکو زیر دمای فعال‌سازی رنگین هستند و در بالای دمای فعال‌سازی تغییر رنگ داده یا بی‌رنگ می‌شوند. این ترکیبات در انواع اصلی مرکب‌های ترموکرومیک آب پایه که با پرتو فرابنفش پخت می‌شوند، برای چاپ بر روی کاغذ، پلاستیک و منسوجات بکار برده می‌شوند (۲۶).برای تبدیل بلور مایع کلستریک و یا لوکو ترموکرومیک به شکل قابل چاپ، معمولاً لازم است آن ها ابتدا میکروکپسوله شده و سپس در امولسیونی از مواد پلیمری پراکنده شوند. این مواد به تنهایی نسبت به محیط خود بسیار حساس هستند و به آسانی تخریب می‌شوند.



شکل ۶: تغییر رنگ مواد ترموکرومیک در دماهای مختلف (۳۷).
Figure 6: Color change of thermochromic materials at different temperatures (37).

بنابراین آن ها معمولاً در لایه‌های و الیاف پلیمری محصور (۳۸) یا در حالت ژل تهیه می‌شوند (۳۹)تا از واکنش‌های محیطی ناخواسته جلوگیری شود. میکروکپسول سازی بلور مایع را می‌توان به عنوان مثال توسط یک فرآیند کواسرواسیون[1] انجام داد. در این فرآیند، امولسیونی از بلور مایع در محلول ژلاتین پوست خوک به عنوان یک هتروپلیمر پروتئینی آب‌دوست (۴۰) و با استفاده از یک میکسر با برش بالا تهیه می‌شود. پس از امولسیون‌سازی، محلولی از صمغ اقاقیا اضافه می‌شود و pH به گونه‌ای تنظیم می‌شود که فرآیند کواسرواسیون آغاز شود. کواسروات به عنوان یک فاز جامد از محلول آبی جدا می‌شود و به طور خود به خود قطرات بلور مایع را می‌پوشاند. با سرد شدن مخلوط تا دمای حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد، یک پوسته ژل هیدراته تشکیل می‌شود که با افزودن سخت کننده‌ای مانند فرمالدئید یا گلوتارآلدئید به میکروکپسول نهایی تبدیل شود. میکروکپسول‌ها از مخلوط واکنش جدا و شسته شده و سپس آب اضافی خارج می‌شود. روش دیگر میکروکپسول سازی مواد ترموکرومیک با استفاده از مواد پلیمری مانند رزین‌های اوره- فرمالدئید یا ملامین- فرمالدئید است (۲۶).

میکروکپسول های ترموکرومیک نسبت به منسوجات تمایل ذاتی جذب ندارند. بنابراین آن‌ها نمی‌توانند بطور مستقیم بر روی منسوجات اعمال شوند. میکروکپسول‌های تشکیل شده در چسب‌های پلیمری معمولی پراکنده شده و برای چاپ آماده می‌شوند. بدین منظور از پلیمرهای محلول در آب مانند پلی وینیل الکل یا پلیمرهای امولسیونی مانند اکریلیک یا پلی یورتان استفاده می‌شوند (۴۱). مواد ترموکرومیک محصور شده پلیمری معمولاً به عنوان پوشش‌های ترموکرومیک برای بهبود ثبات رنگ با بیندر به پارچه‌ها متصل می‌شوند. استفاده از مواد رنگزای ترموکرومیک میکروکپسوله در دهه ۱۹۷۰ میلادی توسعه یافت و پس از آن در صنایع نساجی به‌کار گرفته شد(۴۲). در جدول۱ خلاصه‌ای از تحقیقات اخیر در این حوزه آورده شده است.

[1] Coacervation

جدول ۱: تحقیقات صورت گرفته در حوزه مواد ترموکرومیک.
Table 1: Summary of publications of Thermochromic materials.

Characteristics	Chromic compound	Textile	Application	Ref.
Thermochromic	Rose red TF-R1 pigment and crystal violet lactone pigment	Polypropylene fibers	Temperature indicator	(43)
Thermochromic and phase change material	Microcapsules containing thermochromic phase change materials and crystal violet lactone dye	N/A	Protective clothing and thermoregulation	(44)
Thermochromic and phase	Crystal violet lactone	Poly(methyl methacrylate) microcapsules	Protective clothing	(18)
Thermochromi	N/A	N/A	Review of discoloration mechanism, structures and recent applications of thermochromic materials via different methods	(45)
Thermochromic	Cholesteric liquid crystals microcapsules	Polyvinylpyrrolidone fibers	General application	(46)
Thermochromic	Paste containing blue and orange dyes	Cotton fabric	Military	(47)
Thermochromic, thermosensitive and luminescent	Rare earth materials and reversible thermochromatic pigment crystal violet lactone	Polyacrylonitrile fiber	General application	(48)
Thermochromic and thermosensitive	Light fiber containing$Sr_2ZnSi_2O_7:Eu^{+2}$, Dy^{+3};$Y_2O_2S:Eu^{+3}$, $Mg_2þ$, Ti^{+4} and thermochromic pigment rose red TF-R1	Polyacrylonitrile fibers	Optical and thermal sensors	(49)
Thermo- and electrochromic	Thermochromic inks and graphene oxide	Double-covered yarns	Multifunctional applications of elastic visual sensors and wearable visor	(50)

(ادامه جدول ۱)

Characteristics	Chromic compound	Textile	Application	Ref.
Thermochromic	Ultraviolet curable ink	Polyester and cotton fabric	Non-emissive displays, interior design, art and as indicators in interactive systems	(51)
Thermochromic	Silica nanocapsules loaded with thermochromic leuco dye	Polyester fabric	N/A	(52)
Thermochromic	Gold or silver	Poly(methyl methacrylate) nanofibers	General application	(53)
Thermochromic	N/A	N/A	Risk assessment of BPA in thermochromic textiles by analyzing commercial samples	(54)
Thermochromic and conductive	TurnThermo pigment	N/A	Biosensing	(55)
Thermochromic and conductive	Polypyrrole conducting polymers and thermochromic materials	Cotton with polyester fabric	Active visual camouflage or interactive fabrics	(56)
Thermochromic	Pigment solution	Nylon/spandex fabric	Clothing for physical exhaustion	(57)
Thermochromic	Carbon nanotube	Silicone elastomer	Patterned heating and visual temperature indication	(58)
Thermochromic	Thermochromic pigments	Leather	General application	(59)
Thermochromic	Conductive wires made of stainless steel	Cotton fabric	Chinese calligraphy design and painting and general traditional Chinese applications	(60)
Thermochromic	Indigo, 6-bromo indigo and 6,60-dibromo indigo dyes	Textile: three natural fibers (wool, cotton, and silk); three cotton-based synthetics (filament acetate, filament triacetate, and viscose – Rayon); three polyacrylics (SEF, Creslan 61, and Orlon 75); two polyesters (Dacron 54 and Dacron 64); Nylon 66; and polypropylene	N/A	(61)
Thermochromic	Complex of doped transition metal with rare earths	Leather	Heat-resistant safety products	(62)

مواد رنگزای ترموکرومیک به طور گسترده‌ای در نساجی استفاده می‌شوند، زیرا ویژگی‌های جدیدی را در صنعت نساجی و مد به ارمغان آورده‌اند. با این حال، این تنها زمینه‌ای نیست که در آن از مواد رنگزای ترموکرومیک استفاده می‌شود. انواع کاربردهای غیرنساجی و تولیدکنندگان محصولات نیز مصرف‌کنندگان مواد ترموکرومیک هستند. دماسنج‌ها، نشانگرهای دما و دستگاه‌های نظارت بر بدن را می‌توان از جمله کاربردهای غیرنساجی به حساب آورد. در طول سال‌های اخیر، برای ترموکرومیسم بخش جدیدی در تهیه کالاهای نساجی هوشمند باز شده است.

در حال حاضر از مواد ترموکرومیک برای مد و اثاثیه منزل استفاده می‌شود، به عنوان مثال، لباس های اسکی، رومیزی‌هایی که رنگ آن ها در تماس با ظرف داغ تغییر می‌کند، صندلی‌هایی که تغییر رنگ آن‌ها نشان می‌دهد که فرد در کجا نشسته است و غیره (۷). در طیف منسوجات هوشمند، امکانات کاربردی مانند امنیت یا استتار و همچنین کاربردهای زیبایی در مد را ارائه می‌دهند.

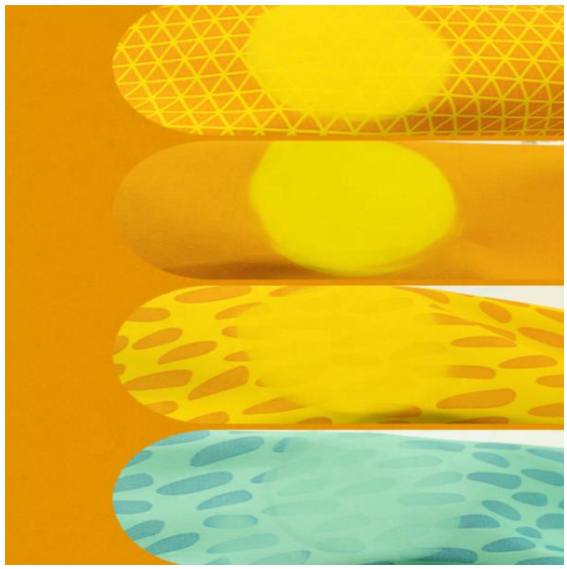
منسوجات ترموکرومیک کاربرد زیادی در امور تحقیقاتی دارند. آن‌ها در حسگرهای دمایی انعطاف‌پذیر (۸)، حسگر چشمی (۴۲، ۶۳) استتار نظامی (۴۷، ۶۴) نمایشگر پوشیدنی، تی‌شرت‌های نشانگر دمای بدن پوشنده به کار گرفته می‌شوند (۱۶). لباس‌های امنیتی ترموکرومیک که برای آتش‌نشان‌ها ساخته شده است، در دمای پایین رنگ می‌شوند اما وقتی در معرض دمای بالا قرار می‌گیرند سفید می‌شوند. این تغییر رنگ دو اثر دارد: خطر را به آتش نشانان هشدار می‌دهد، ضمنا رنگ سفید به انعکاس گرما کمک می‌کند (۱۴).

۲-۵- منسوجات ترموکرومیک

مواد رنگزای ترموکرومیک به صورت میکروکپسول در بازار در دسترس است. این مواد با افزایش و کاهش دما به طور مکرر و برگشت‌پذیر تغییر رنگ می‌دهند. برای مثال وقتی دما کاهش می‌یابد، رنگ عمیق‌تر می‌شود و با افزایش دما رنگ روشن‌تر می‌شود و یا از بین می‌رود. فاصله دمایی متفاوت مواد ترموکرومیک را می‌توان با انتخاب متفاوتی از عوامل کنترل کننده دما ایجاد کرد. تغییر رنگ مواد رنگزای ترموکرومیک شامل تغییر رنگ در دمای پایین، تغییر رنگ با لمس دست، تغییر رنگ در دمای بالا، تغییر رنگ به بی‌رنگی و تغییر از رنگی به رنگ دیگر است. از طریق فناوری چاپ و رنگرزی

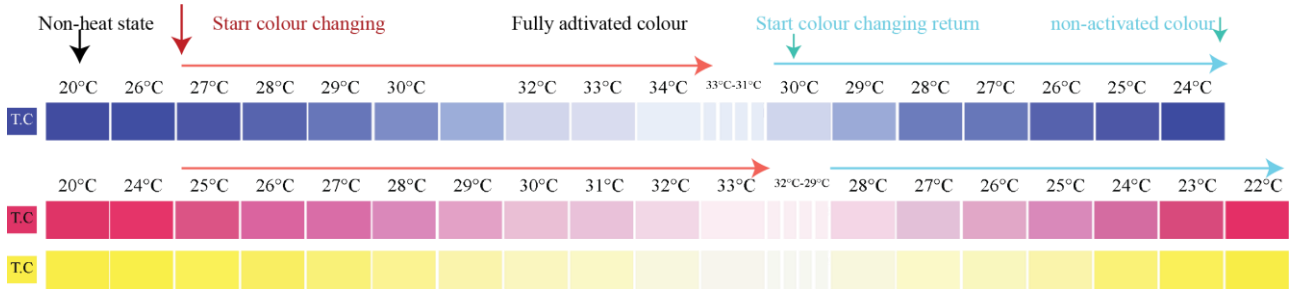
مواد رنگزای ترموکرومیک بر روی پارچه اعمال می‌شوند (۶۵).
لباس‌های هوشمند هر دو عملکرد حس کردن و پاسخ‌گویی را دارند. این لباس‌ها مانند سایر لباس‌های معمولی مورد استفاده قرار می‌گیرند و بر اساس طرح برنامه‌ریزی شده، عملکردهای ویژه دیگری به لباس اضافه می‌کنند. شکل ۷ نمونه‌ای از پارچه‌های پلی‌استر چاپ شده با مواد ترموکرومیک که قسمت هایی از پارچه که در اثر حرارت از حالت رنگی به بیرنگی تبدیل شده است را نشان می‌دهد. می‌توان با مواد ترموکرومیک الگوهای خاصی را روی منسوج چاپ کرد، به‌گونه‌ای که تغییر دمای محیط‌های خارجی با محیط‌های داخلی منجر به تغییر رنگ روی منسوج می‌شود. این امر بر روی توهم بصری یا احساسات روانی افراد تاثیر می‌گذارد و باعث جذابیت دیداری می‌شود (۶۶).

سطح تغییر رنگ به تضاد بین رنگ ابتدایی و انتهایی پارچه اشاره دارد. این تضاد را می‌توان به صورت یک تغییر چشمگیر در رنگ یا رنگ نسبت به حالت اولیه بیان کرد. بر این اساس، سطح تغییر رنگ به میزان تفاوت رنگ بین حالت‌های فعال و غیرفعال بستگی دارد. دمای محیط، زمان و توزیع گرمایش و سرمایش بر آهنگ سرعت تغییر رنگ تأثیر می‌گذارد. زمان لازم برای گرمایش کافی و توزیع گرما در الگو به نوع منبع گرمایی مورد استفاده بستگی دارد. شکل ۸ تغییر رنگ سه ماده ترموکرومیک آبی، قرمز و زرد را با تغییر دما نشان می‌دهد (۶۷).
مواد ترموکرومیک می‌توانند از حالت رنگی به بی‌رنگی و یا برعکس تغییر کنند. به منظور گسترش پالت رنگ، می‌توان مواد ترموکرومیک را با مواد رنگزای کلاسیک ترکیب کرد و رنگ‌های جدیدتری به دست آورد. همانگونه که در شکل ۹ مشهود است هنگامی که ماده ترموکرومیک بی‌رنگ شود، رنگ اولیه نمایان می‌شود. وقتی که ماده ترموکرومیک به رنگ اصلی خود برمی‌گردد، رنگ مخلوط شده دو رنگ نمایان می‌شود (۶۸).



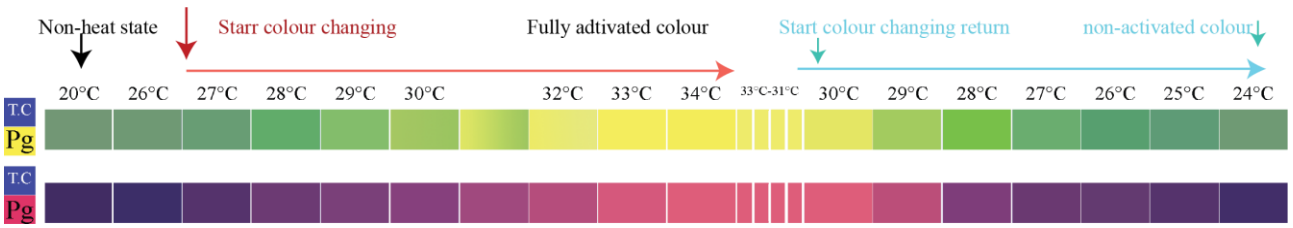
شکل ۷: پارچه‌های پلی‌استر چاپ شده با مواد ترموکرومیک (۶۶).

Figure 7: Polyester fabrics printed with thermochromic materials (66).



شکل ۸: سه رنگ ترموکرومیک آبی، قرمز و زرد که با افزایش و کاهش دما تغییر رنگ می‌دهند (۶۷).

Figure 8: Blue, red and yellow thermochromic dye change with increasing and decreasing temperature (67).



شکل ۹: تغییر رنگ ترکیب ترموکرومیک آبی با ماده رنگزای زرد و رنگ قرمز نساجی معمولی با تغییرات دما (۶۷).

Figure 9:Color change mixing thermochromic blue dyes with classic yellow dyes and thermochromic blue with classic red dyes with increasing and decreasing temperature (67).

۲-۵-۱- ساخت لباس‌های هوشمند با مواد ترموکرومیک

مواد ترموکرومیک را می‌توان در پلاستیک‌ها، فلزات و سایر مواد نیز به کار برد، اما این بخش بر روی تحقیقات کاربرد مواد ترموکرومیک بر روی منسوجات متمرکز شده است. در سال ۲۰۰۳ میلادی اورث[۱] و اینترنشنال فشن ماشینز[۲] «داینامیک دبل ویوا»[۳] را ساختند. شکل ۱۰ یکی از اولین نمونه‌های مستند استفاده از مواد ترموکرومیک لوکو برای ایجاد یک نمایشگر پارچه‌ای است که از طریق رسانای الکتریکی گرم شده و تغییر رنگ رخ می‌دهد. تغییرات دما توسط کامپیوتر کنترل می‌شود. این سامانه از یک صفحه نمایشگر ۶۴ پیکسلی با عناصر کنترل شده به صورت جداگانه ساخته شده است که هدف آن ایجاد تنوع رنگی است. تغییر رنگ در منسوجات، ارتباط بین یک الگوی تکراری و یک الگوی نرم افزاری تکراری را به تصویر می‌کشد که با تغییر رنگ تنوع بصری ایجاد می‌کند (۶۹).

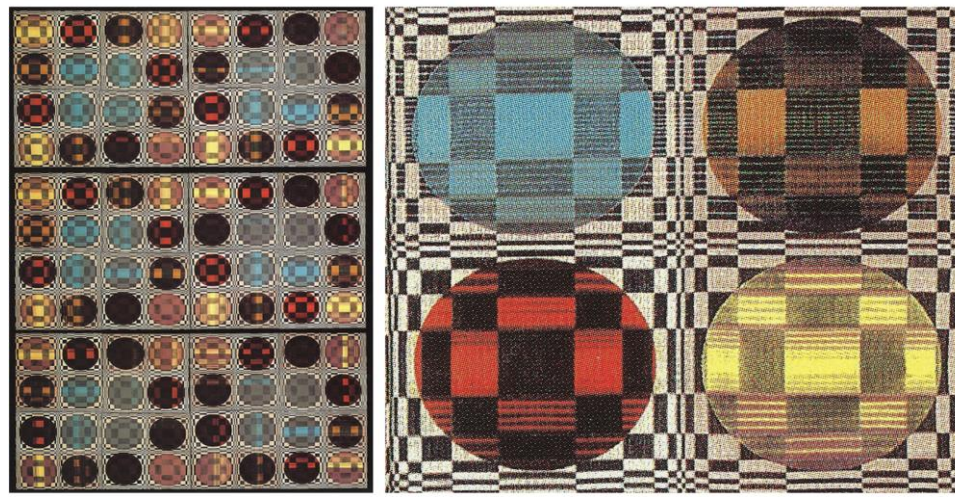
گروه تحقیقاتی ایکس اس لبز[۴]، لباس خال‌دار پنبه‌ای روشن را طراحی و تهیه کرده است که توسط رقصندگان در یک اجرا پوشیده شدند. الگوی چاپی با مواد ترموکرومیک از استتار حیوانات الهام گرفته شده است (شکل ۱۱). مواد ترموکرومیک چاپ شده روی این لباس‌ها به گرمای بدن انسان حساس است و به قسمت هایی از لباس که در در زمان نمایش توسط دیگر رقصندگان لمس می‌شود به صورت چشمی واکنش نشان می‌دهد (۷۱).

لباس هوشمندی[۵] که توسط کالدر[۶]،آیلت[۷]، لوچارت[۸] و همکارانشان ساخته شده است (شکل ۱۲) نشان دهنده پتانسیل مواد ترموکرومیک است. در این پروژه از دامن با الگوی اوریگامی استفاده شده است که دمای مواد رنگزای ترموکرومیک آن به صورت الکترونیکی کنترل می‌شود. هدف، تغییر رنگ با دمای کنترل شده و تغییر الگوی دامن است. این پروژه ظرفیت استفاده از مواد ترموکرومیک را در پوشاک بررسی می‌کند و فعال سازی و غیرفعال سازی به‌طور کامل از طریق یک سیستم نرم‌افزاری کنترل شده توسط حسگر کینکت[۹] (حسگر حساس به رنگ) بررسی می‌کند (۷۳).

۲-۶- نقاط ضعف مواد ترموکرومیک

ترکیبات ترموکرومیک آلی عموما موادی حساس و ناپایدار هستند که در شرایط محیطی تخریب می‌شوند و یا عملکرد آن ها به شدت کاهش می یابد. در اثر واکنش های جانبی این ترکیبات با مواد موجود در محیط، تعداد رفت و برگشت‌های تغییر رنگ کاهش می‌یابد. معمولا برای افزایش پایداری مواد ترموکرومیک، اجزای سازنده آن‌ها را به روش‌های مختلف میکروکپسول سازی می‌کنند. منسوجات چاپ شده با میکروکپسول های ترموکرومیک در برابر شستشو از خواص ثباتی مناسبی برخوردار هستند به طوری که عملکرد آن‌ها پس از ۲۰ بار شستشو تغییر محسوسی نمی‌کند (۷۴).

[1] Orth
[2] International Fashion Machines (IFM)
[3] Dynamic Double Weave I
[4] XS Labs
[5] Smart Costumes
[6] Calder
[7] Aylett
[8] Louchart
[9] Kinect



شکل ۱۰: "داینامیک دبل ویوا" توسط اینترنشنال فشن ماشینز تولید شده است (سمت چپ). شکل سمت راست جزئیات منسوجات (تصویر اصلی برش خورده است)، که تغییرات رنگ را در نواحی گرم شده در دایره‌های طرح‌دار نشان می‌دهد (رنگ‌های تیره‌تر به رنگ‌های روشن‌تری مانند آبی روشن، نارنجی، قرمز و زرد تغییر یافته است (۷۰).

Figure 10: "Dynamic Double Wave I" produced by International Fashion Machines (left). The figure on the right of the textiles (the original image is cropped), which shows the color changes in the warm areas in the patterned designs (darker colors are changed to bright colors such as light blue, orange, red and change) (70).

شکل ۱۱: لباس چاپ شده با مواد ترموکرومیک گروه تحقیقاتی ایکس اس لب (۷۲).

Figure 11: Clothes with thermochromic printing research group XS Labs (72).

شکل ۱۲: لباس هوشمند تهیه شده توسط کالدر و همکارانش، چپ: حالت غیرفعال و راست: فعال شده (۷۳).

Figure 12: (left) in passive and (right) activated state in smart clothing by Calder et al (73).

با این حال محصولات چاپ شده با مواد ترموکرومیک نسبت به نور، حلال‌ها و دماهای بالا بسیار حساس هستند.

اگرچه ویژگی‌های رنگ‌سنجی مرکب های ترموکرومیک روی منسوجات از منظر کاربرد قابل‌توجه است، تأثیر دما بر مقادیر رنگ سنجی مرکب های ترموکرومیک تا حد زیادی مورد مطالعه قرار نگرفته است. بهتر است برای سنجش وابستگی دمایی خواص رنگ‌سنجی مرکب‌های ترموکرومیک، تولید گرما و افزایش دما توسط ولتاژ اعمال شده کنترل شده باشد و با تغییر دقیق دما از طریق سامانه‌های گرمایش و سرمایش انجام شود (۲۷). فریسکووچ[1] و همکارانش (۷۵)از صفحه آلومینیمی با جوهر سفید به عنوان بستری برای گرم‌کردن در دمای بالا و از بستر کاغذی برای قرار گرفتن در معرض نور استفاده کردند. آزمایش های ثبات مواد ترموکرومیک چاپ شده تحت تأثیر نور UV و دمای بالای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفته است. نتایج تایید می‌کند که مرکب‌های ترموکرومیک ثبات و پایداری ضعیفی در برابر نور و دمای بالا دارند. کولچار[2] و همکارانش (۷۶) پس از آزمایش بر روی نمونه های کاغذ، اشاره کردند که فرآیند تغییر رنگ در بالاترین دما، حتی بسیار فراتر از دمای فعال‌سازی، به‌طور کامل به بی‌رنگی نمی‌رسد و هر چه ضخامت لایه چاپ شده بیشتر باشد زمان فعال‌شدن رنگ بیشتر می‌شود. کولچار و همکارانش (۷۷) در مقاله دیگر به این نتیجه رسیدند که عملکرد نمونه‌های ترموکرومیک تنها به دما بستگی ندارد، بلکه تاریخچه حرارتی(تعداد دفعات رفت برگشت از حالت رنگی به بی‌رنگی و برعکس) نیز بسیار مهم است. بنابراین خواص مواد ترموکرومیک به طور همزمان به چندین عامل فیزیکی وابسته است. در تمامی این پژوهش‌ها نمونه‌ها به روش چاپ اسکرین آماده شده است.

۳- نتیجه‌گیری

مقاله حاضر مروری علمی بر خواص و کاربرد مواد ترموکرومیک در

[1] Friškovec

[2] Kulčar

منسوجات به منظور هوشمندسازی آنان است و در آن کاربردها، تجاری، مشخصه‌های عملکردی و چالش‌های اصلی منسوجات مورد بحث قرار گرفته است. این مواد دسته‌ای از منسوجات با فناوری پیشرفته و پتانسیل فوق‌العاده در زمینه‌های مختلف هستند که آن‌ها را قادر به دریافت محرک و پاسخگویی می‌کند. این منسوجات به دلیل خواص بی‌نظیر در زمینه‌های مختلفی مانند نمایشگرهای پوشیدنی، حسگرها، استتار، روش‌های ضدجعل و حتی صنایع نظامی به یک حوزه فعال تحقیقاتی تبدیل شده است.

منسوجات ترموکرومیک از طریق آغشته‌سازی یا رنگرزی مواد ترموکرومیک بر روی منسوجات به دست می‌آیند. این مواد در اثر گرما تغییر رنگ می‌دهند. تغییر رنگ می‌تواند از حالت بی رنگی به رنگی و یا برعکس و یا تغییر فام یا شدت رنگ باشد. عملکرد مواد ترموکرومیک مورد استفاده می‌توانند مستقیم یا غیرمستقیم باشد. مواد ترموکرومیک مستقیم شامل سازوکار بازآرایی مولکولی، تغییر بلور مایع، استریوایزومریسم و سامانه های ماکرومولکولی هستند که بطور مستقیم سبب ایجاد تغییر رنگی در اثر حرارت می‌شوند. مواد ترموکرومیک غیرمستقیم شامل مواد رنگزای لوکو هستند. آن ها در اثر حرارت تغییر رنگ نمی‌دهند بلکه در اثر واکنش با اسیدها یا یون‌های آزاد شده در اثر حرارت منجر به ایجاد رنگ می‌شوند.

عموما مواد ترموکرومیک به دلیل حساسیت شان نسبت به عوامل محیطی از خواص ثباتی مناسبی برخوردار نیستند. بنابراین این مواد با ترکیباتی از قبیل رزین اوره- فرمالدئید، ملامین- فرمالدئید یا مواد پلیمری دیگر میکروکپسوله شده و به همراه یک ماده پلیمری مانند چسب‌ها بر روی پارچه اعمال می‌شوند تا از واکنش‌های محیطی ناخواسته جلوگیری شود. به منظور ایجاد تنوع رنگی زیاد می‌توان مخلوطی از مواد ترموکرومیک را با مواد رنگزای معمولی را تهیه منسوجات هوشمند بکار برد.

تحقیق در زمینه منسوجات هوشمند به طور مداوم در حال توسعه است و رویکرد چند رشته ای عامل اصلی این گسترش قابل توجه است. دانش طراحی، مواد هوشمند، میکروالکترونیک و شیمی اساساً با درک عمیق ساخت پارچه ادغام شده است و پارچه هایی با کارایی بالا و بهتر را در دسترس بشر قرار داده است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافعی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

این مقاله از بخش مروری پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته طراحی پارچه و لباس دانشگاه الزهرا(س) با عنوان تهیه منسوجات هوشمند با مواد ترموکرومیک و بخش عملی در آزمایشگاه پژوهشگاه رنگ و با حمایت مادی پژوهشگاه انجام شده است. با تشکر از اساتید راهنما که اینجانب را در نوشتن پایان نامه و مقاله مستخرج از آن حمایت و یاری کردند.

۴- مراجع

1. Seeboth A, Klukowska A, Ruhmann R, Lötzsch D. Thermochromic polymer materials. Chin J Polym Sci. 2007;25:123-35. https://doi.org/10.1021/cr400462e.
2. Chowdhury AM, Butola B, Joshi M. Application of thermochromic colorants on textiles: Temperature dependence of colorimetric properties. Rev Prog Color Relat Top. 2013;43(3):231-7. https://doi:10.1111/cote.12015.
3. Ramlow H, Andrade KL, Immich APS. Smart textiles: an overview of recent progress on chromic textiles. J Text Inst. 2020;112(1):152–71. https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1785071.
4. Hauser PJ. Textile Dyeing. In: Durasevic V, Sutlovic A, Osterman DP. (eds.) From murex purpura to sensory photochromic textiles. Intech Open Access Publisher; 2011. 57-76.
5. Christie R. Chromic materials for technical textile applications. In: Das A. (eds.) Advances in the dyeing and finishing of technical textiles. Woodhead Publishing; 2013. 3–36.
6. B. Sun, "Smart materials and structures", South Africa: Cape Town: Cape Peninsula University of Technology Lecture at Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH); 2015.
7. Lee SJ, Son YA, Suh HJ, Lee DN, Kim SH. Preliminary exhaustion studies of spiroxazine dyes on polyamide fibers and their photochromic properties. Dyes Pigm. 2006;69(1-2):18-21. https://doi:10.1016/j.dyepig.2005.02.019
8. Bamfield P, Hutchings M. Chromic phenomena: technological applications of colour chemistry. RS.C; 2010.
9. Bruno TJ, Svoronos PD.CRC handbook of fundamental spectroscopic correlation charts. Florida: CRC Press; 2005.
10. Shibahashi Y, Michiyuki Y, Masahiro I. Method for alternately expressing color-memorizing photochromic function in toy element, and an alternately color-memorizing photochromic toy. Washington, DC: U.S Patent; 2013.
11. Durasevic V, Sutlovic A, Osterman DP. From murex purpura to sensory photochromic textiles. Intech Open

Access Publisher; 2011.
12. Hu JL. Adaptive and functional polymers, textiles and their applications. Singapore: World Scientific; 2011.
13. Suhag N, Singh S. Types of chromism & its applications in fashion & textile designing. Int J Enhanc Res Sci Technol Eng. 2015;4:2319-7463.
14. Tang S, Stylios G. An overview of smart technologies for clothing design and engineering. Int J Clothing Sci Technol. 2006;18(2):108-28.
https://doi.org/10.1108/09556220610645766.
15. Durr JH. Thermochromism. Chem Rev. 1963;63(1):65-80. https://doi.org/10.1021/cr60221a005.
16. Maleki L. How to get changing patterns on a textile surface by using thermo chromic pigments and an inherently conductive polymer (thesis). University of Borås, Swedish School of Textiles; 2013.
17. Talvenmaa P. Introduction to chromic materials. introduction to chromic materials. In: Mattila H, editor. Intelligent textiles and clothing. Woodhead Publishing in Textiles; 2006. 193-205.
18. Rijavec T, Bračko S.Smart dyes for medical and other textiles.In: Morris A, editor.Smart textiles for medicine and healthcare: Materials, systems and applications. London: Woodhead Publishing; 2007. 123-149.
19. Towns AD.Thermochromic composite materials formulated from spirolactone colour formers. ChemiChromics USA 99;2015. 1171-82.
20. Aklujkar PS, Kandasubramanian B.A review of microencapsulated thermochromic coatings for sustainable building applications. J Coat Technol Res.2021;18:19-37.
21. Strižić Jakovljević M, Kulčar R, Friškovec M, Lozo B, Gunde MK.Light fastness of liquid crystal-based thermochromic printing inks.Dyes Pigm.2020;180:108-482. https://doi:10.1016/j.dyepig.2020.1084.
22. Abdulkarim JM, Khsara AK, Al-Kalany HN, Alresly RA. Impact of Properties of Thermochromic Pigments on Knitted Fabrics. Int J Sci Eng Res. 2016;4:1693-1705.
23. Tözüm SM, Sennur AA, Cemil A.Microencapsulation of three-component thermochromic system for reversible color change and thermal energy storage.Fibers Polym. 2018;19(3):660-9. https://doi:10.1007/s12221-018-7801-3.
24. Sage L.Thermochromic liquid crystals.Liq Cryst. 2011;38(11-12):1551-61.
https://doi.org/10.1080/02678292.2011.631302
25. Mitov M.Cholesteric liquid crystals in living matter.Soft Matter;2017;13(23):4176–4209.
https://doi.org/10.1039/c7sm00384f
26. Kulčar R, Friškovec M, Hauptman N, Vesel A, Gunde MK.Colorimetric properties of reversible thermochromic printing inks.Dyes Pigm. 2010;863:271-7.
https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2010.01.
27. Sahebkar K, Indrakar S, Srinivasan S, Thomas S, Stefanakos E. Electrospun microfibers with embedded leuco dye-based thermochromic material for textile applications. J Ind Text. 2021;3188S-3200S.
https://doi.org/10.1177/1528083720987216.
28. Mather RR. Intelligent textiles. Rev Prog Color. 2001;36-41.
29. de Jesus R, Valente PA. Minimal Computation Structures for Visual Information Applications based on Printed Electronics (PhD thesis). Portugal: Universidade NOVA de Lisboa; 2016.
30. Chowdhury AM, Butola B, Joshi M. Application of thermochromic colorants on textiles: Temperature dependence of colorimetric properties. Rev Prog Color Relat Top. 2013;43(3):231-7.
https://doi.org/10.1111/cote.12015.
31. Kim SH, Suh HJ, Cui JZ, Gal YS, Jin SH, Koh K. Crystalline-state photochromism and thermochromism of new spiroxazine. Dyes Pigm. 2002;53(3):251-6. https://doi:10.1016/S0143-7208(02)00022-0.
32. Hadjoudis E, Vittorakis M, Moustakali-Mavridis I. Photochromism and thermochromism of schiff bases in the solid state and in rigid glasses. Tetrahedron. 1987;43(7):1345-60.
https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)90255-8
33. Hadjoudis E, Vittorakis M, Moustakali-Mavridis I. Photochromism and thermochromism of Schiff bases in the solid state: structural aspects. Chem Soc Rev. 2004;33(9):579–88. https://doi:10.1039/B303644H
34. Waseem I.An Investigation into Textile Applications of Thermochromic Pigments (thesis). UK: Edinburgh, Scotland; 2012.
35. Agriopoulou S, Stamatelopoulou E, Skiada V, Varzakas T.Nanobiotechnology in food preservation and molecular perspective.In: Varzakas T, Skiada V, editors. Nanotechnology Enhanced Food Packaging (Internet). Wiley-VCH; 2022. 327-359.
36. Kooroshnia M.Demonstrating color transitions of leuco dye- based thermochromic inks as a teaching approach in textile and fashion design.In: Proceedings of the Nordic Design Research Conference Copenhagen. Denmark; 2013.
37. Pinterest. San Francisco (CA): Pinterest Inc.; c2021 (cited 2023 Apr 14). Available from: https://i.pinimg.com /originals/325f26eb12b3704edc04389ec751f56f.jpg
38. Li F, Zhao Y, Wang S, Han D.Thermochromic core–shell nanofibers fabricated by melt coaxial electrospinning. J Appl Polym Sci. 2009;112(1):269-74.
https://doi.org/10.1002/app.29384.
39. MALHERBE I, SANDERSON RD, SMIT E.Reversibly thermochromic micro-fibres by coaxial electrospinning. Polymer.;2010;51(22):5037-43.
https://doi:10.1016/j.polymer.2010.09.018.
40. Mohammadsadegh A, Gharagozlou M, Allahkaram SR.A Review on Improving the Corrosion Resistance of 316L Stainless Steel by Coating with Nanoparticles of Chitosan/Gelatin Using Electrophoretic Deposition Method.J Stud Color World. 2023;327-341. https:// dor1.net/20.1001.1.22517278.1401.12.4.3 (In Persian).
41. LeSar JD, Rao NM, Williams NM, Pantano JP, Ricci ML, Osher LS, Hetherington VJ, Kawalec JS.A novel thermochromic liquid crystal fabric design for the early detection of high-risk foot complications: A proof-of-concept study.Japma. 2017;107(3):200-7.
https://doi.org/10.7547/15-151.
42. Mattila HR. Intelligent Textiles and Clothing.Woodhead Publishing;2006.
43. Zhang Y, Hu Z, Xiang H, Zhai G, Zhu M.Fabrication of visual textile temperature indicators based on reversible thermochromic fibers.Dyes Pigm. 2019;162:704-11. https://doi:10.1016/j.dyepig.2018.11.007.
44. Geng X, Wei L, Wang Y, Lu J, Wang J, Wang N. Reversible thermochromic microencapsulated phase change materials for thermal energy storage application in thermal protective clothing. Appl Energy. 2018;217:281-94. https://doi.org/10.1016/j.apenergy. 2018. 02.150.
45. Cheng Y, Zhang X, Fang C, Chen J, Wang Z. Discoloration mechanism, structures and recent

applications of thermochromic materials via different methods: A review. JMST. 2018;34(12):2225-34. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.05.016.
46. Guan Y, Zhang L, Wang D, West JL, Fu S.Preparation of thermochromic liquid crystal microcapsules for intelligent functional fiber.Mater Des. 2018;147:28-34. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.03.030
47. Karpagam KR, Saranya KS, Gopinathan J, Bhattacharyya A.Development of smart clothing for military applications using thermochromic colorants. J Text Inst.2016;108 (7): 1122-7. https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1220818.
48. Jin Y, Bai Y, Zhu Y, Li X, Ge M.Thermosensitive luminous fiber based on reversible thermochromic crystal violet lactone pigment.Dyes Pigm. 2017;146:567-75. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.07.
49. Jin Y, Shi C, Li X, Wang Y, Wang F, Ge M.Preparation and luminescence studies of thermosensitive PAN luminous fiber based on the heat sensitive rose red TF-R1 thermochromic pigment.Dyes Pigm. 2017;139:693-700. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.01.
50. Li Q, Li K, Fan H, Hou C, Li Y, Zhang Q, Wang H.Reduced graphene oxide functionalized stretchable and multicolor electrothermal chromatic fibers.J Mater Chem C. 2017;5(44):11448-53. https://doi.org/10.1039/c7tc02471a .
51. Ahmed Z, Wei Y, Torah R, Tudor J.Actively actuated all dispenser printed thermochromic smart fabric device. Electron Lett. 2016;52(19):1601-3. https://doi.org/10.1049/el.2016.1073
52. Zhang W, Ji X, Zeng C, Chen K, Yin Y, Wang C.A new approach for the preparation of durable and reversible color changing polyester fabrics using thermochromic leuco dye-loaded silica nanocapsules. J Mater Chem C. 2007;5(32):8169-78. https://doi:10.1039/D2TC05127C
53. Busuioc C, Evanghelidis A, Galatanu A, Enculescu I.Direct and contactless electrical control of temperature of paper and textile foldable substrates using electrospun metallic-web transparent electrodes.Sci Rep. 2016;6(1):1-9. https://doi: 10.1038/srep34584.
54. He SM, Wei MY, Liu F, Xue WL, Cheng LD. Risk of Bisphenol A (BPA) in Thermochromic Textiles. In 2nd Annual International Conference on Advanced Material Engineering AME 2016. Paris; 2016.
55.Howell N, Devendorf L, Tian RK, Galvez TV.Biosignals as Social Cues: Ambiguity and Emotional Interpretation in Social Displays of Skin Conductance. In Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems. New York; 2016 .
56. Huang G, Liu L, Wang R, Zhang J. Smart color-changing textile with high contrast based on single-sided conductive fabric. J Mater Chem C. 2016;4(30):7589-94. https://doi.org/10.1039/c6tc02051h.
57. Potuck A, Meyers S, Levitt A, Beaudette E, Xiao H, Chu CC, Park H. Development of Thermochromic Pigment Based Sportswear for Detection of Physical Exhaustion. Fashion Pract. 2016;8(2):279-95. https://doi.org/10.1080/17569370.2016.1216990.
58. Li Y, Zhang Z, Li X, Zhang J, Lou H, Shi X, et al. A smart, stretchable resistive heater textile. J Mater Chem C. 2017;5(1). https://doi.org/10.1039/c6tc04399b.
59. Salom A, Candas A, Zengin A, Bitlisli BO.Temperature Sensitive Colour Changing Leathers with Thermochromic Pigments. J Soc Leather Technol Chem. 2016;100:314-20.
60. Chen HJ, Huang LH. An investigation of the design potential of thermochromic home textiles used with electric heating techniques.Math Probl Eng. 2015;1-5. https://doi.org/10.1155/2015/151573
61. Ramig K, Lavinda O, Szalda DJ, Mironova I, Karimi S, Pozzi F, Shah N, Samson J, Ajiki H, Massa L, Mantzouris D, Karapanagiotis I, Cooksey C.The nature of thermochromic effects in dyeings with indigo, 6-bromoindigo, and 6,6′-dibromoindigo, components of Tyrian purple. Dyes Pigm. 2015;117:37-48. https://doi:10.1016/j.dyepig.2015.01.
62. Tamilmani V, Kanadasan D, Muthazhagan R, Sreeram KJ, Rao JR, Nair BU.Thermochromism for Smart Leathers.J Am Leather Chem Assoc. 2015;110(06):161-4.
63. Cai G, Yang M, Pan J, Cheng D, Xia Z, Wang X.Large-Scale Production of Highly Stretchable CNT/Cotton/Spandex Composite Yarn for Wearable Applications.ACS Appl Mater Interfaces. 2018;10(38) :32726-35. https://doi.org/10.1021/acsami.8b11885
64. Yan C, Wang J, Kang W, Cui M, Wang X, Foo CY, Chee KJ, Lee PS. Highly stretchable piezoresistive graphene–nanocellulose nanopaper for strain sensors. Adv Mater. 2014;26(13):2022-7. https://doi.org/10.1002/adma.201304742.
65. Sun L, Chen S, Gu Z, Luo Y, Hu Y.Applied Research On Design Of Smart Clothing Base On Thermochromic Material. Adv Soc Sci Res J. 2017;4(7). https://doi.org/10.14738/assrj.47.2928.
66. Yunai Textile (Internet). China: Yunai Textile Co., Ltd.; c2021 (cited 2023 Apr 14). Available from: https://www.iyunaitextile.com/temperature-color-change-treatment-100-polyester-thermochromic-fabric-product/.
67. Dumitrescu D, Kooroshnia M, Lan H.Silent colours: Designing for wellbeing using smart colours.In Proceedings of the International Colour Association (AIC) Conference. Lisbon; 2018.
68. Talvenmaa P. Introduction to chromic materials.In Mattila H. Intelligent textiles and clothing. Sawston: Woodhead Publishing in Textiles; 2006. 193-205.
69. Ferrara M. Bengisu M. Intelligent design with chromogenic materials. JAIC. 2014;13:54-66.
70. Clarke ESHJ.Digital visions for fashion and textiles: Made in code. Thames and Hudson Ltd;2012.
71. Berzowska JM. Soft computation through conductive textiles. In Proceedings of the International Foundation of Fashion Technology Institutes Conference. 2007.
72. XS Labs. Montreal: XS Labs; c2007 (cited 2023 Apr 14). Available from: http://xslabs.net/catalogue-pdf/ XS_ catalogue.pdf
73. Calder L, Magalhaes J, Aylett R, Louchart S, Padilla S, Chantler M, MacVean A. Kinect-Based RGB Detection For ‘Smart’ Costume Interaction.In Proceedings 19th International Symposium on Electronic Art ISEA. Sydney; 2014.
74. Nelson G. Application of microencapsulation in textiles. Int J Pharm. 2002;242(1-2):55-62. https://doi.org/ 10.1016/ S0378-5173(02)00141-2
75. Friškovec M, Kulčar R, Gunde MK. Light fastness and high-temperature stability of thermochromic printing inks. Color Technol. 2013;129(3):214-22. https://doi.org/10.1111/cote.12020
76. Kulčar R, Friškovec M, Gunde MK, Knešaurek N.Colorimetric properties of UV-thermochromic inks. In 13th International Conference on printing, design and

graphic communications Blaž Baromić. Estonia; 2009.
77. Kulčar R, Gunde MK, Knešaurek N. Dynamic colour possibilities and functional properties of thermochromic printing inks. Acta graphica: znanstveni časopis za tiskarstvo i grafičke komunikacije. 2012;23(1-2):25-36.

How to cite this article:

Abeditame V, Talebpour Faride, Gharanjig K, Jalili M. Review of the Application of Thermochromic Materials in the Preparation of Smart Textiles . J Stud color world. 2023;13(2): 185-200. https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.2.4.8 [In Persian].